

TEMPOS DE RESPOSTA DE UM SISTEMA DE CONTROLE ELETRÔNICO DE PULVERIZAÇÃO VIA MODELOS DE REGRESSÃO NÃO LINEAR

Lucas Santana da CUNHA¹
Sônia Maria De Stefano PIEDADE²
Casimiro Dias GADANHA JUNIOR³

- **RESUMO:** Os controladores eletrônicos de pulverização visam minimizar a variação das taxas de insumos aplicadas no campo. Fazem parte de um sistema de controle, e permitem a compensação da variação de velocidade de deslocamento do pulverizador durante a operação. Há vários tipos de controladores eletrônicos de pulverização disponíveis no mercado. Assim, uma das formas de selecionar qual o mais eficiente nas mesmas condições, ou seja, em um mesmo sistema de controle, é quantificar o tempo de resposta do sistema para cada controlador específico. Este trabalho teve como objetivo estimar tais tempos de resposta. Visando simular o experimento em campo, uma bancada foi projetada em Laboratório de Tecnologia de Aplicação, constituída por: controlador eletrônico de pulverização, simulador de velocidade, base de aquisição de dados e sistema hidráulico. Os tempos de resposta foram estimados via modelos de regressão não linear, estes resultantes da soma de regressões lineares ponderadas por funções distribuição acumulada. Os modelos utilizados foram o Logístico e de Gompertz, que resultam de uma soma ponderada de duas regressões lineares constantes com peso dado pela função distribuição acumulada logística e de Gumbel, respectivamente. Reparametrizações foram propostas para inclusão do tempo de resposta do sistema de controle como parâmetro dos modelos, com o intuito de melhorar a interpretação e inferência estatística dos mesmos.
- **PALAVRAS-CHAVE:** Regressão não linear; função de distribuição acumulada; agricultura de precisão; controladores eletrônicos.

¹Universidade Estadual de Londrina - UEL, Departamento de Estatística, 10.011, CEP: 86055620, Londrina, PR, Brasil. E-mail: lscunha@uel.br

²Universidade de São Paulo – USP, Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Departamento de Ciências Exatas, CEP: 13418-900, Piracicaba, SP, Brasil. E-mail: soniamsp@usp.br

³Universidade de São Paulo – USP, Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Departamento de Biosistemas, CEP: 13418-900, Piracicaba, SP, Brasil. E-mail: cdgadhanh@usp.br

1 Introdução

A produção agrícola está intimamente ligada à expansão do agronegócio. O crescimento das áreas de plantio e, principalmente, o aumento da produtividade têm sido associados ao uso de novas tecnologias. Um dos fatores que tem contribuído para o aumento da produtividade na agricultura é o emprego de produtos fitossanitários, os quais têm se mostrado fundamentais para a proteção e preservação do potencial produtivo de culturas agrícolas.

Os pulverizadores convencionais são calibrados, previamente, para realizar aplicações com pressão ou vazão, e velocidade de deslocamento constantes na operação, resultando assim, numa taxa de aplicação uniforme. No entanto, sabe-se que é quase impossível manter a mesma velocidade pré-estabelecida no campo, devido às mais diversas causas, como por exemplo, condições do terreno, obstáculos, etc. Consequentemente, a distribuição do produto fitossanitário não será feita de forma uniforme no terreno alvo, ocasionando em taxas de aplicação diferentes na extensão da área.

Os controladores eletrônicos de pulverização surgem na tentativa de minimizar essa variação das taxas de aplicação devido às mudanças de velocidade. Eles fazem parte de um sistema de controle, e permitem a compensação da variação de velocidade de deslocamento do pulverizador durante a operação, além de oferecer também controle automático do fechamento de seções e aplicações a taxas variáveis (MOHAMMADZAMANI *et al.*, 2009).

O tempo de resposta do controlador, também conhecido como tempo de reação, é definido como o período entre o comando e sua efetiva mudança de vazão nas pontas de pulverização no momento de aplicação (ANTUNIASSI, 1999). Já o tempo determinado pelo instante da mudança até a estabilização por completa do pulverizador, denomina-se tempo de resposta do sistema de controle.

Há vários tipos de controladores eletrônicos de pulverização disponíveis no mercado. Assim, uma das formas de selecionar qual o mais eficiente nas mesmas condições, ou seja, em um mesmo sistema de controle, é quantificar o tempo de resposta do sistema de controle para cada controlador específico. Logo, encontrar uma relação entre a variável vazão e o tempo, considerando o instante de determinada mudança, seria o ideal para quantificar esse tempo de resposta do sistema de controle.

Vários trabalhos foram realizados para obtenção de estimativas pontuais do tempo de resposta de vários sistemas de controle eletrônico de pulverização (CARVALHO e ANTUNIASSI, 2012; GADANHA JUNIOR, 2000). Porém, estes utilizaram métodos empíricos e descritivos. A utilização destes não é o mais adequado uma vez que não se utiliza um modelo probabilístico para o problema e consequentemente, não se encontra estimativas intervalares para os tempos de resposta.

Uma técnica estatística que permite atingir tal objetivo é a análise de regressão. O termo regressão foi utilizado pela primeira vez, por Sir Francis Galton (1889), que propôs a “Lei de Regressão Universal” em seu livro *Natural Inheritance*.

Basicamente, os modelos de regressão são divididos em duas classes: os lineares e não lineares.

Em geral, a regressão linear é usada para especificação de modelos puramente empíricos. Por exemplo, se a resposta de interesse, usualmente representada por Y , depender de uma única variável independente, x , a partir da representação gráfica de x versus Y , pode-se sugerir possíveis modelos. Na presença de várias variáveis independentes, uma alternativa para o ajuste de um possível modelo é partir, inicialmente, de um modelo completo e avaliar a qualidade do ajuste por meio de diagnósticos de regressão (BELSLEY *et al.*, 1980; COOK e WEISBERG, 1982).

Já os modelos de regressão não linear são considerados quando existe algum conhecimento prévio sobre o estudo para sustentar que a relação entre resposta e preditores segue uma particular forma funcional. Tal conhecimento pode ser desde uma equação diferencial que remete a um particular modelo, como é o caso de modelos de crescimento, ou simplesmente uma restrição sobre a função, como o de ser monótona, típico de curvas de acúmulo, para a qual pode-se ter várias funções disponíveis. Dentre as vantagens da utilização do modelo de regressão não linear, é que frequentemente existe interpretação para a maioria de seus parâmetros (SCHABENBERGUER e PIERCE, 2002).

Fulton *et al.* (2005) e Vieira (2013) utilizaram o modelo de regressão não linear Logístico de quatro parâmetros para encontrar o tempo de resposta de um sistema de controle eletrônico de pulverização, mas ambos forneceram apenas estimativas pontuais dos mesmos, obtidas por meio de funções dos parâmetros dos modelos.

Tendo em vista que não há trabalhos em que o parâmetro de interesse, tempo de resposta, está representado nos modelos, e, conseqüentemente, não há inferência estatística aos mesmos, como por exemplo, estimativas intervalares, foi proposto neste trabalho uma metodologia que considere tais modelos. Para tanto foram utilizados os modelos de regressão não linear, obtidos por um processo que consiste da soma de regressões lineares ponderadas por funções de distribuição acumulada.

2 Material e métodos

2.1 Material

Para obtenção do tempo de resposta de um sistema de controle eletrônico de pulverização, realizaram-se ensaios no Laboratório de Tecnologia de Aplicação, localizado no Departamento de Engenharia de Biosistemas da Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, no município de Piracicaba, São Paulo, Brasil.

Uma bancada constituída por: controlador eletrônico de pulverização, simulador de velocidade, base de aquisição de dados e sistema hidráulico foi projetada para realização dos ensaios visando simular o experimento em campo.

O sistema eletrônico foi composto de controlador eletrônico Vcom 8.4[®], Verion Agricultura Inc. (Brasil), simulador de velocidade MFG-4221 20MHz DDS Minipa[®]

Inc. (EUA), válvulas elétricas reguladora e de corte automático de seção Geoline, Geoline® Inc. (Itália), transdutor de fluxo com turbina axial removível de marca Polmac®, Polmac Inc. (Itália) e transdutor de pressão Teejet®, Spraying System Co (EUA). As pontas de pulverização utilizadas foram Teejet, Spraying System®, do modelo XR com ângulo de aspersão de 110° ambas produzindo jato leque plano padrão de uso amplificado: XR 110 02 (baixa vazão), XR 110 04 (média vazão) e XR 110 06 (alta vazão) (SPRAYING SYSTEM, 2011).

Com o intuito de submeter o sistema às mais próximas condições operacionais encontradas no campo, foram realizadas simulações para as três diferentes pontas de pulverização fazendo-se mudanças na velocidade. A variação da pressão (kPa) em função do tempo em segundos (s) foi coletada antes e após a mudança realizada. Assim, o tempo de resposta, t_r , é igual a diferença do valor do tempo em que a pressão volta a estabilizar, t_e (tempo a ser estimado), pelo tempo em que realizou-se a mudança, t_m (tempo fixo). Mais detalhes são encontrados em Vieira (2013).

O tempo exato da mudança de velocidade foi $t_m = 2s$ para todas as simulações. Denominou-se mudanças na ascendente e na descendente quando há o aumento e o decréscimo da velocidade, respectivamente.

Para encontrar um modelo de regressão que descreve os dados, considerou-se uma soma ponderada de duas regressões lineares constantes $f_1(x) = \beta_{10}$ e $f_2(x) = \beta_{20}$, com peso dado por uma função de distribuição acumulada (FDA), $\pi_2(x)$, da seguinte forma:

$$\eta(x; \boldsymbol{\theta}) = \beta_{10}[1 - \pi_2(x)] + \beta_{20}\pi_2(x)$$

logo,

$$\eta(x; \boldsymbol{\theta}) = \beta_{10} + (\beta_{20} - \beta_{10})\pi_2(x). \quad (1)$$

Considerando-se uma FDA que possui um ponto de inflexão, ou seja, que tenha uma forma sigmoideal de “S”, então β_{10} e β_{20} são duas assíntotas horizontais, pois $\lim_{x \rightarrow -\infty} \pi_2(x) = 0$ e $\lim_{x \rightarrow \infty} \pi_2(x) = 1$, e assim, a soma resulta em um modelo de regressão não linear que atende as características dos dados de uma curva assintótica. Utilizou-se as FDA’s da distribuição logística e Gumbel, pois abrangem as características de assimetria da transição do tempo de mudança, t_m , até o ponto de estabilização, t_e . Logo os modelos encontrados para descrever os dados foram:

$$\eta(x; \boldsymbol{\theta}) = \beta_{10} + \frac{\beta_{20} - \beta_{10}}{1 + \exp\{-(x - x_I)/s\}} \quad (2)$$

$$\eta(x; \boldsymbol{\theta}) = \beta_{10} + (\beta_{20} - \beta_{10}) \exp\{-\exp\{-(x - x_I)/s\}\}. \quad (3)$$

Como resultado dessa soma ponderada, os modelos não lineares (2) e (3) são exatamente os modelos de regressão não linear Logístico e de Gompertz, de duas assíntotas horizontais, respectivamente. Em que $\boldsymbol{\theta} = [\beta_{10}, \beta_{20}, x_I, s]^T$ é o vetor de

parâmetros dos modelos; β_{10} e β_{20} são as assíntotas horizontais; x_I é o ponto de inflexão da curva; e s é um parâmetro de locação.

Para incluir o tempo de resposta, t_r , como um dos parâmetros dos modelos, foi feito uma reparametrização, considerando as regras de Zeviani (2013), em um ponto de fração, q , da assíntota β_{20} de maior valor (superior) na ascendente e da assíntota de menor valor (inferior) na descendente. Denomina-se esse ponto de tempo de estabilização, t_e , ou seja, tempo no qual a pressão volta estabilizar após a mudança realizada. Mas, como o tempo de resposta, t_r , é igual a diferença entre o tempo de estabilização, t_e , e o ponto em que houve a mudança, $t_m = 2s$, então $t_e = t_r + 2$, e assim, inclui-se o novo parâmetro no modelo.

Baseado num critério descritivo para encontrar o tempo de resposta, adotado por Gadanha Junior (2000), considerou-se as frações $q = 0,95$, da assíntota superior, para ajuste das curvas na ascendente, e $q = 1,05$ da assíntota inferior, na descendente, como uma fração considerável para representar o ponto de estabilização, t_e , nas mudanças de velocidade. Assim, os modelos que foram ajustados para estimar os tempos de resposta são:

$$\eta(x; \theta) = \beta_{10} + \frac{\beta_{20} - \beta_{10}}{\left(1 + \frac{1-q^*}{q^*}\right)^{\frac{x_I - x}{x_I - 2 - t_r}}} \quad (4)$$

$$\eta(x; \theta) = \beta_{10} + (\beta_{20} - \beta_{10}) \exp \left\{ \frac{-1}{-\log(q^*) \left(\frac{x - x_I}{x_I - 2 - t_r}\right)} \right\} \quad (5)$$

em que $\theta = [\beta_{10}, \beta_{20}, x_I, t_r]^T$ e $q^* = (q\beta_{20} - \beta_{10})/(\beta_{20} - \beta_{10})$, $q = (0,95; 1,05)$.

Para verificar a adequação do ajuste dos modelos aos dados foram feitas as análises dos resíduos e posteriormente calculadas as medidas de curvatura de Bates e Watts (1980). Tais medidas também foram utilizadas, juntamente com o critério de Akaike (1974) para seleção dos modelos. Inferências para o parâmetro tempo de resposta t_r foram obtidas por meio da verossimilhança e da distribuição assintótica dos estimadores. Utilizou-se o *software* R (2015) para realização desse estudo.

3 Resultados

Os ajustes dos modelos aos dados convergiram para todos os saltos de velocidade em ambas as pontas de pulverização, para os dois modelos utilizados, considerando o máximo de 50 iterações. Os valores iniciais utilizados foram baseados na inspeção do diagrama de dispersão.

Para a ponta de pulverização de baixa vazão XR 110 02 verificou-se que o tempo de resposta estimado para o modelo Gompertz foi maior que o correspondente no modelo Logístico, para cada mudança de velocidade (Tabela 1).

Ao avaliar à extensão da não linearidade pelas medidas de curvatura de Bates e Watts (1980), verificou-se que tanto a curvatura devido à parametrização (CP)

Tabela 1 - Estimativa, limite inferior (LI) e limite superior (LS) para o intervalo de confiança assintótico (95%) para o parâmetro de interesse tempo de resposta, t_r , dos modelos Logístico e de Gompertz para a ponta de baixa vazão

Velocidade	Modelo ajustado	Tempo de Resposta (t_r)		
		LI	LS	Est.
4 a 8	Logístico	6,01	6,36	6,19
	Gompertz	6,88	7,62	7,25
8 a 4	Logístico	5,32	6,05	5,69
	Gompertz	6,17	6,88	6,53

quanto a intrínseca (CI) foram muito próximas para ambos os modelos para as duas mudanças de velocidade (Tabela 2). Para todos ajustes os valores da CI são aceitáveis, considerando 0,3 como ponto de corte (ROBINSON e HAMANN, 2011). Por essas medidas de curvatura e pelo AIC observa-se que para a mudança que ocorre o aumento da velocidade, o modelo Logístico obteve melhor resultado em relação ao modelo de Gompertz. Já para a mudança no decréscimo da velocidade, os melhores resultados são obtidos pelo modelo de Gompertz.

Tabela 2 - Medidas do critério de informação de Akaike (AIC) e de curvatura devido ao efeito de parametrização (CP) e intrínseca (CI) dos modelos Logístico e de Gompertz para a ponta de baixa vazão

Velocidade	Modelo	Curvatura		AIC
		CP	CI	
4 a 8	Logístico	0,0714	0,0373	354,17
	Gompertz	0,1006	0,0579	378,28
8 a 4	Logístico	0,1149	0,0530	443,42
	Gompertz	0,0721	0,0522	395,21

Pela Tabela 1 observa-se que os tempos de resposta para os modelos selecionados, Logístico para as mudanças no acréscimo e Gompertz para as mudanças no decréscimo, são estatisticamente iguais, pois os intervalos de confiança se sobrepõem. Assim, o tempo em que o sistema gasta para voltar a estabilizar devido às mudanças de velocidade para a ponta de baixa vazão utilizada é o mesmo na ascendente e na descendente.

Valores preditos para os modelos selecionados, de acordo com as medidas de não linearidade e pelo AIC, estão representados na Figura 1, juntamente com a banda de confiança (95%) e com destaque para a estimativa intervalar assintótica (95%) do tempo de resposta do sistema para a ponta de baixa vazão XR 110 02.

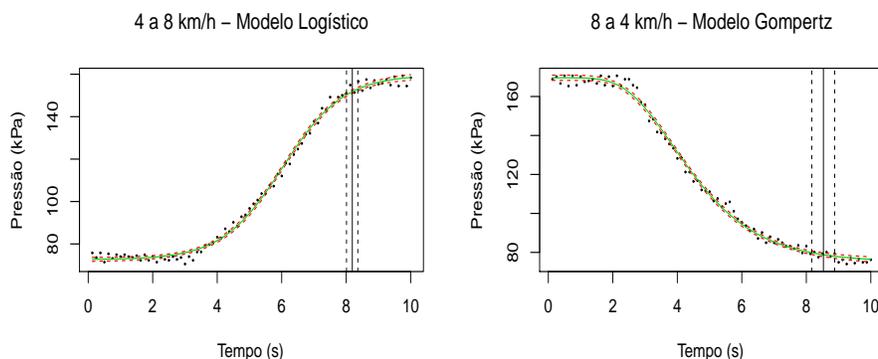


Figure 1 - Valores observados e preditos com banda de confiança assintótica (95%) para a pressão (kPa) em função do tempo (s) para cada mudança de velocidade. Linhas verticais identificam a estimativa intervalar assintótica (95%) do tempo de resposta do controlador eletrônico de pulverização para a ponta de baixa vazão XR 110 02.

Para a ponta de pulverização de média vazão XR 110 04 tem-se resultados semelhantes aos da ponta de baixa vazão. Observa-se da Tabela 3 que dentro de cada mudança de velocidade, a estimativa do tempo de resposta para o modelo de Gompertz é sempre maior que as estimativas correspondentes do modelo Logístico. Isso deve-se a fato do primeiro ter uma curva assimétrica à direita, o que faz torná-lo mais “lento” para atingir a fração desejada da assíntota, e conseqüentemente, o tempo de resposta.

Tabela 3 - Estimativa, limite inferior (LI) e limite superior (LS) para o intervalo de confiança assintótico (95%) para o parâmetro de interesse tempo de resposta, t_r , dos modelos Logístico e de Gompertz para a ponta de média vazão

Velocidade	Modelo ajustado	Tempo de Resposta (t_r)		
		LI	LS	Est.
12 a 16	Logístico	2,70	2,86	2,78
	Gompertz	2,82	3,04	2,93
16 a 12	Logístico	2,79	3,04	2,91
	Gompertz	3,05	3,35	3,20
12 a 18	Logístico	3,50	3,66	3,58
	Gompertz	3,75	3,99	3,87
18 a 12	Logístico	3,84	4,13	3,99
	Gompertz	4,33	4,60	4,47

Resultados semelhantes também são encontrados a respeito das medidas de não

linearidade. Tanto CP e CI quanto o AIC indicam que o modelo melhor ajustado para as mudanças na ascendente é o Logístico. Já na descendente, o modelo de Gompertz tem melhores resultados em relação aos critérios adotados (Tabela 4).

Tabela 4 - Medidas do critério de informação de Akaike (AIC) e de curvatura devido ao efeito de parametrização (CP) e intrínseca (CI) dos modelos Logístico e de Gompertz para a ponta de média vazão

Velocidade	Modelo	Curvatura		AIC
		CP	CI	
12 a 16	Logístico	0,0510	0,0532	459,35
	Gompertz	0,0526	0,0716	478,92
16 a 12	Logístico	0,0654	0,0555	490,26
	Gompertz	0,0517	0,0635	479,81
12 a 18	Logístico	0,0383	0,0344	490,70
	Gompertz	0,0434	0,0509	523,45
18 a 12	Logístico	0,0549	0,0451	528,73
	Gompertz	0,0358	0,0403	478,24

Para os modelos selecionados, observa-se que o tempo de resposta é menor para as mudanças feitas na ascendente para ambos os saltos (Tabela 3). Verifica-se ainda que os tempos de resposta para as mudanças de velocidade com salto de 6 km/h são estatisticamente maiores que as mudanças com saltos de 4 km/h, ou seja, o sistema demora mais para estabilizar quando o salto de velocidade é maior utilizando-se a ponta de pulverização de média vazão.

Na Figura 2, está a representação dos valores preditos para os modelos selecionados, juntamente com a banda de confiança (95%) e com destaque para a estimativa intervalar assintótica (95%) do tempo de resposta de cada mudança realizada para a ponta de média vazão. Tem-se, que as diferenças entre os valores observados e preditos são menores na região próxima do ponto de estabilização para os dados na ascendente do que na descendente. Isso resulta em intervalos de confiança mais precisos para o tempo de resposta do sistema nas mudanças em que ocorre o aumento da velocidade.

Da Tabela 5 tem-se as estimativas do parâmetro de interesse para a ponta de pulverização de alta vazão XR 110 06. Verifica-se que os tempos de resposta estão muito próximos para ambos os modelos em ambas as mudanças em que a amplitude total é de apenas 0,43. Observa-se também que dentro de cada mudança os intervalos de confiança do parâmetro de interesse estão sobrepostos, ou seja, os tempos de resposta são estatisticamente iguais para os dois modelos propostos.

Igualmente às pontas anteriores, os modelos selecionados para as mudanças na ascendente e na descendente foram o Logístico e Gompertz, respectivamente (Tabela 6).

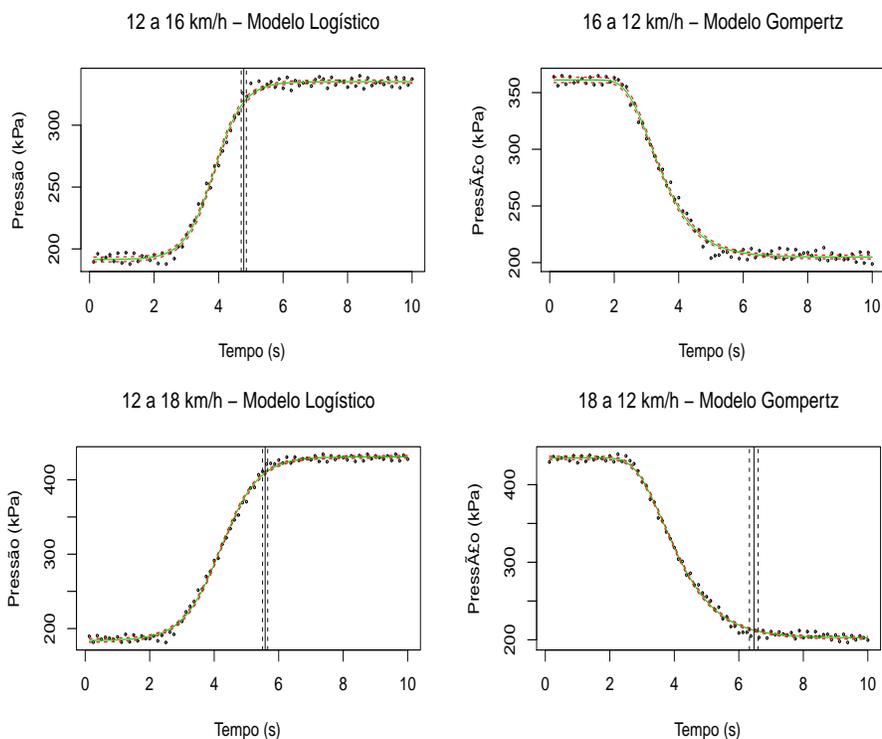


Figure 2 - Valores observados e preditos com banda de confiança assintótica (95%) para a pressão (kPa) em função do tempo (s) para cada mudança de vazão. Linhas verticais identificam a estimativa intervalar assintótica (95%) do tempo de resposta do controlador eletrônico de pulverização para a ponta de média vazão XR 110 04.

Tabela 5 - Estimativa, limite inferior (LI) e limite superior (LS) para o intervalo de confiança assintótico (95%) para o parâmetro de interesse tempo de resposta, t_r , dos modelos Logístico e de Gompertz para a ponta de alta vazão

Velocidade	Modelo ajustado	Tempo de Resposta (t_r)		
		LI	LS	Est.
18 a 24	Logístico	2,61	2,79	2,70
	Gompertz	2,70	2,95	2,82
24 a 18	Logístico	2,78	3,02	2,90
	Gompertz	2,99	3,28	3,13

Tabela 6 - Medidas do critério de informação de Akaike (AIC) e de curvatura devido ao efeito de parametrização (CP) e intrínseca (CI) dos modelos Logístico e de Gompertz para a ponta de alta vazão

Velocidade	Modelo	Curvatura		AIC
		CP	CI	
18 a 24	Logístico	0,0591	0,0620	465,53
	Gompertz	0,0621	0,0853	488,00
24 a 18	Logístico	0,0610	0,0570	478,04
	Gompertz	0,0533	0,0692	477,74

Apesar dos valores estimados dos tempos de resposta pelos modelos selecionados terem sido muito próximos para as mudanças realizadas, tem-se que foram estatisticamente diferentes (Tabela 5). Assim, o sistema também é mais lento para corrigir a vazão quando há a redução da velocidade utilizando-se a ponta de alta vazão.

Também para a ponta de alta vazão, a amplitude do intervalo de confiança para a mudança na descendente é maior que na ascendente, apesar dessa medida ser menor em comparação com as outras pontas de baixa e média vazão (Figura 3).

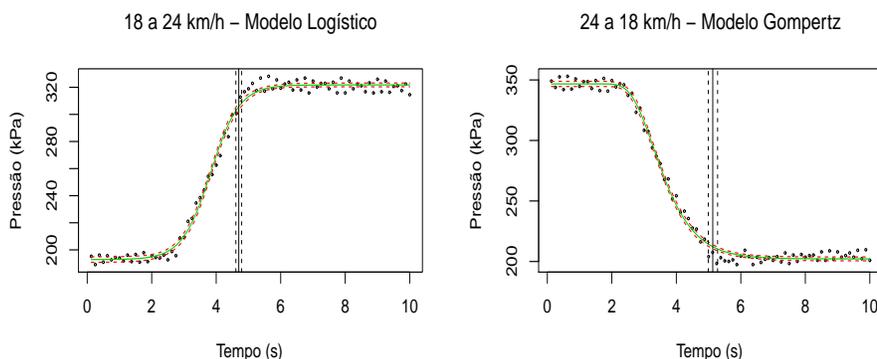


Figure 3 - Valores observados e preditos com banda de confiança assintótica (95%) para a pressão (kPa) em função do tempo (s) para cada mudança de velocidade. Linhas verticais identificam a estimativa intervalar assintótica (95%) do tempo de resposta do controlador eletrônico de pulverização para a ponta de alta vazão XR 110 06.

Por fim, os tempos de resposta obtidos no presente trabalho e os respectivos encontrados em Vieira (2013), foram apresentados na Tabela 7. O modelo utilizado no trabalho anterior foi o Logístico, em que as estimativas para o tempo de resposta foram obtidas por uma função do parâmetro x_I , ponto de inflexão. Assim, observa-

se que com a inclusão do parâmetro de interesse no modelo, tem-se estimativas mais baixas para o tempo de resposta do sistema nos dados na ascendente.

Tabela 7 - Estimativa, limite inferior (LI), limite superior (LS) para o intervalo de confiança assintótico (95%) e estimativa de Vieira (2013), para o parâmetro de interesse tempo de resposta, t_r , para as três diferentes pontas

Ponta	Velocidade	Tempo de Resposta (t_r)			
		LI	LS	Est.(atual)	Est.(antes)
Baixa vazão	4 a 8	6,01	6,36	6,19	8,45
	8 a 4	6,17	6,88	6,53	5,53
Média vazão	12 a 16	2,70	2,86	2,78	3,25
	16 a 12	3,05	3,35	3,20	3,83
	12 a 18	3,50	3,66	3,58	4,42
Alta vazão	18 a 12	4,33	4,60	4,47	4,16
	18 a 24	2,61	2,79	2,70	3,56
	24 a 18	2,99	3,28	3,13	3,20

Agora, considerando que o modelo de Gompertz teve melhor ajuste para os dados na descendente, em que a curva não é simétrica em relação ao ponto de inflexão, x_I , tem-se que o tempo de resposta foi maior na ponta de baixa vazão em comparação com o trabalho anterior. Para ponta de média vazão, também foi menor na mudança de 18 a 12 km/h porém maior para a mudança de 16 a 12 km/h. Por fim, tem-se que o tempo de resposta foi estatisticamente igual para a ponta de alta vazão.

Conclusões

Para as mudanças de velocidade na ascendente, o modelo selecionado pelo critério de Akaike (AIC) foi o Logístico. Já para as mudanças na descendente, o modelo selecionado foi o de Gompertz. Os tempos de resposta para a ponta de pulverização XR 110 02 (baixa vazão) são iguais para as duas mudanças de velocidade, sendo pouco mais de 6 segundos. Já para a ponta XR 110 04 (média vazão) houve diferença para as mudanças no aumento e na redução de velocidade para os dois saltos. Para o salto de 4 km/h a diferença pontual foi de 0,42 segundos. Já para o salto de 6 km/h foi de 0,89 segundos. Para a ponta XR 110 06 (alta vazão), essa diferença pontual foi menor, 0,43 segundos, mas também foi significativa. Os tempos de resposta do sistema de controle eletrônico foram satisfatórios para ambas as pontas de pulverização, em especial, às de média e alta vazão.

Agradecimentos

O primeiro autor agradece à Profa. Dra. Sônia Maria De Stefano Piedade pela orientação e motivação, ao Prof. Dr. Casimiro Dias Gadanha Junior e ao meu amigo Raniére Rodrigues Vieira pela contribuição e concessão dos dados utilizados nesse trabalho, e por fim, à Coordenadoria para o Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela bolsa de estudo. Os autores agradecem aos revisores e editores pelas sugestões apresentadas ao artigo.

CUNHA, L. S.; PIEDADE, S. M.; GADANHA JUNIOR, C. D. Response times of an electronic control system of spraying via nonlinear regression models. *Rev. Bras. Biom.*, Lavras, v.35, n.4, p.862-874, 2017.

■ **ABSTRACT:** *Electronic spray controllers are designed to minimize the variation in rates of inputs applied in the field. Are part of a system of control and allow the compensation of speed variation of spray displacement during operation. There are several types of spray controllers electronic available on the market. So, a way to select the most efficient under the same conditions, i.e. in a same system of control, is quantifying the response time of system for each specific controller. The aim of this study was estimate such response times. In order to simulate the experiment in the field, a workbench was designed in Laboratory of Application Technology, consisting of: electronic spraying controller, speed simulator, data acquisition base and hydraulic system. Response times were estimated by nonlinear regression models, resulting from the sum of linear regressions weighted by cumulative distribution functions. The models used were Logistics and Gompertz, resulting from a weighted sum of two linear regression with weights given by cumulative distribution function Logistic and Gumbel, respectively. Reparametrizations have been proposed for inclusion the response time of system of control as a parameter of the models, in order to improve the interpretation and statistical inference.*

■ **KEYWORDS:** *Nonlinear regression; cumulative distribution function; precision agriculture; electronic controllers.*

Referências

AKAIKE, H. A. A new look at the statistical model identification. *IEEE Transation on Automatic Control*, New York, v.19, p.716-723, 1974.

ANTUNIASSI, U. R. *Avaliação de sistemas de injeção de defensivos para utilização em agricultura de precisão*, 1999. 83p. Tese livre Docência (Disciplina Mecanização Agrícola/ Departamento de Engenharia Rural) - Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Botucatu, 1999.

BATES, D. M.; WATTS, D. G. Relative Curvature Measures of Nonlinearity. *Journal of the Royal Statistical Society. Serie B. Methodological*, London, v.42, p.1-25, 1980.

- BELSLEY, D. A.; KUH, E.; WELSCH, R. E. *Regression Diagnostics: Identifying Influential Data and Sources of Collinearity*. New York: John Wiley, 1980. 292p.
- CARVALHO, W. P. A.; ANTUNIASSI, U. R. Avaliação de resposta de um controlador de fluxo com DGPS submetido à variação de velocidade de vôo em condições de vôo simulado em laboratório. *Energia na Agricultura*, Botucatu, v.27, n.2, abr./jun., p.124-144, 2012.
- COOK, R. D.; WEISBERG, S. *Residuals and influence in regression*. New York: Chapman and Hall, 1982. 240p.
- FULTON, J. P.; SHEARER, S. A.; HIGGINS, S. F.; DARR, M. J.; STOMBAUGH, T. S. Rate response assessment from various granular VRT applicators. *Transactions of ASAE*, St. Joseph, v.48, n.6, p.2095-2103, 2005.
- GALTON, F. *Natural Inheritance Macmillan*. London: Macmillan & Co, 1889. 259p.
- GADANHA JÚNIOR, C.D. *Avaliação do tempo de resposta de controladores eletrônicos em pulverizadores agrícolas*, 2000. 125p. Tese (Doutorado Energia na Agricultura), Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Botucatu, 2000.
- MOHAMMADZAMANI, D. et al. Variable rate herbicide application using the global positioning system for generating a digital management map. *International Journal of Agriculture & Biology*, Pakistan, v.11, n.2, p.178-182, 2009.
- R CORE TEAM. *R: A language and environment for statistical computing*. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. ISBN 3-900051-07-0, URL. Disponível em: <http://www.R-project.org>. Acesso em: 09 jan. 2015.
- ROBINSON, A. P.; HAMANN, J. D. *Forest analytics with R*. New York: Springer, 2011. 354p.
- SCHABENBERGER, O.; PIERCE, F. J. *Contemporary statistical models for the plant and soil Sciences*. Boca Raton: CRC, 2002. 738p.
- SPRAYING SYSTEM. *TEEJET*. Teejet technologies: catalog 50A-P. Wheaton, 2011. p. 192.
- VIEIRA, R. R. *Tempo de resposta de um controlador eletrônico em sistemas de aplicação a taxas variáveis em pulverizações agrícolas*, 2013. 78 p. Dissertação (Mestrado em Máquinas Agrícolas) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2013.
- ZEVIANI, W. M. *Parametrizações interpretáveis em modelos não linear*, 2013. 146p. Tese (Tese de Doutorado) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2013.

Recebido em 21.12.2015.

Aprovado após revisão em 02.09.2017.